

Piezokeramische Vielschichtaktoren sowie ein Verfahren zu ihrer Herstellung

Die Erfindung betrifft piezokeramische Vielschichtaktoren sowie ein Verfahren zu ihrer Herstellung.

- 5 Piezokeramische Vielschichtaktoren werden als Monolithen hergestellt, das heißt, der aktive Werkstoff, auf dem vor dem Sintern durch ein Siebdruckverfahren Innenelektroden aufgetragen werden, wird als sogenannte Grünfolie zu einem Stapel aufeinandergelegt, der zu einem Grünkörper verpresst wird. Das Verpressen des Grünkörpers wird in der Regel durch Laminieren unter Druck- und
10 Temperatureinwirkung in Laminierformen durchgeführt.

In Figur 1 ist ein solcherart hergestellter piezokeramischer Vielschichtaktor 1 stark vergrößert schematisch dargestellt. Der Aktor besteht aus gestapelten dünnen Schichten 2 piezoelektrisch aktiven Werkstoffs, beispielsweise Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), mit dazwischen angeordneten leitfähigen Innenelektroden 3, die
15 alternierend an die Aktoroberfläche geführt werden. Außenelektroden 4, 5 verbinden die Innenelektroden 3. Dadurch werden die Innenelektroden 3 elektrisch parallel geschaltet und zu zwei Gruppen zusammengefasst. Die beiden Außenelektroden 4, 5 sind die Anschlusspole des Aktors 1. Sie sind über die Anschlüsse 6 mit einer hier nicht dargestellten Spannungsquelle verbunden. Wird
20 über die Anschlüsse 6 eine elektrische Spannung an die Außenelektroden 4, 5 gelegt, wird diese auf alle Innenelektroden 3 parallel übertragen und verursacht ein elektrisches Feld in allen Schichten 2 des aktiven Werkstoffs, der sich dadurch mechanisch verformt. Die Summe aller dieser mechanischen Verformungen steht an der Endfläche des Kopfbereichs 7 sowie an der Endfläche des Fußbereichs 8
25 des Vielschichtaktors 1 als nutzbare Dehnung und/oder Kraft 9 zur Verfügung.

Die Figur 2 zeigt einen Schnitt durch die Außenelektrode 4 und die Oberfläche des piezokeramischen Vielschichtaktors 1 nach dem Stand der Technik. In dieser Figur ist der Aufbau einer Außenelektrode zu sehen. Auf die zu einem Stapel

- 2 -

gepressten dünnen Schichten 2 des piezoelektrisch aktiven Materials wird im Bereich der an die Oberfläche 10 des Vielschichtaktors 1 herausgeführten Innenelektroden 3, beispielsweise durch galvanische Verfahren oder Siebdruck von Metallpaste, eine Grundmetallisierung 11 zur Verbindung der gleichgepolten
5 Innenelektroden 3 aufgebracht. Diese Grundmetallisierung 11 wird durch eine weitere Schicht 12 aus einem metallischen Werkstoff verstärkt, beispielsweise durch ein strukturiertes Blech oder ein Drahtnetz. Die Verbindung der Verstärkungsschicht 12 mit der Grundmetallisierung 11 erfolgt mittels einer Verbindungsschicht 13, in der Regel einer Lotschicht. An die Verstärkungsschicht
10 12 wird der elektrische Anschlussdraht 6 gelötet.

Außenelektroden auf der Oberfläche 10 eines Aktors 1, die wie beschrieben aufgebaut sind, weisen einen gravierenden Nachteil auf. Während des Betriebes wirken auf den inaktiven Bereich, den Isolierbereich 14, der unter der Grundmetallisierung 11 liegt, starke Zugspannungen. Da dieser Isolierbereich 14
15 zusammen mit der Grundmetallisierung 11 und der Verbindungsschicht 13 eine homogene Einheit bildet, versagt diese beim Überschreiten der Zugfestigkeit des schwächsten Gliedes und es bilden sich Risse. Der dargestellte Rissverlauf tritt nach etwa 10^6 Belastungszyklen auf. Aufgrund der auftretenden Spannungen verlaufen die Risse 15 in der Regel von der spröden und wenig zugfesten
20 Grundmetallisierung 11 in den Isolierbereich 14 und werden dort von Bereichen mit hohen Zugspannungen eingefangen, bevorzugt an den Elektrodenspitzen 16 der nicht die Grundmetallisierung 11 berührenden Elektroden 3, oder sie beginnen in den Bereichen maximaler Zugspannung an den Elektrodenspitzen 16 und verlaufen in Richtung der Grundmetallisierung 11. Die Ausbreitung eines Risses
25 17 entlang einer die Grundmetallisierung 11 berührenden Innenelektrode 3 ist als unkritisch einzustufen, da ein solcher Rissverlauf die Funktion des Aktors nicht beeinträchtigt. Risse 15 dagegen, die unkontrolliert durch den Isolierbereich 14 verlaufen, sind sehr kritisch, da sie den Isolationsabstand verringern und die Wahrscheinlichkeit eines Aktorausfalls durch Überschlüsse stark erhöhen.

- 3 -

Problemlösungen werden zum Beispiel in den Patentanmeldungen DE 198 60 001 A1, DE 394 06 19 A1, DE 196 05 214 A1 beschrieben. Es wird dort vorgeschlagen, den Bereich zwischen einer nicht die Grundmetallisierung berührenden Elektrode und der Grundmetallisierung mit einem Füllmaterial
5 geringer Zugfestigkeit oder einem Hohlraum zu versehen. Die wesentlichen Nachteile dieser Vorgehensweise sind darin zu sehen, dass das Füllmaterial mit einem zusätzlichen, komplexen Verfahrensschritt aufgebracht werden muss, dass das Füllmaterial unvermeidbar die Eigenschaften der Aktors negativ beeinflusst und im Falle der eingebrachten Hohlräume diese in einem weiteren
10 Verfahrensschritt vor dem Aufbringen der Grundmetallisierung wieder geschlossen werden müssen.

Eine andere Problemlösung wird in DE 199 28 178 A1 vorgeschlagen. Hier wird der monolithische Aufbau in kleine Teilbereiche zerlegt und alternierend mit inaktiven, elektrodenfreien Bereichen wieder aufgebaut. Hierbei soll innerhalb
15 eines aktiven Bereiches die maximal mögliche Zugspannung unterhalb des zur Rissbildung notwendigen Wertes bleiben. Das Verfahren ist fertigungstechnisch schwierig und führt nicht zur notwendigen Reduktion der Spannungen im Isolierbereich, so dass immer eine latente Rissgefahr bestehen bleibt.

Aufgabe der Erfindung ist es, die Vielschichtaktoren so zu gestalten, dass die in
20 den Vielschichtaktoren zur Rissbildung führenden Ursachen möglichst vermieden werden.

Die Lösung der Aufgabe erfolgt dadurch, dass auf der Oberfläche des inaktiven Bereichs, des Isolierbereichs, durch die Oberfläche unterbrechende Abtragungen eine Struktur erzeugt wird. Die Grundmetallisierung wird ausschließlich auf der
25 durch die Struktur verbliebene Oberfläche aufgetragen. Dadurch ist die Außenelektrode nicht vollflächig mit der Oberfläche des Vielschichtaktors verbunden und die Steifigkeit des Verbundes, bestehend aus der Oberfläche des Isolierbereichs, der Grundmetallisierung, der Verbindungsschicht und der Verstärkungsschicht wird herabgesetzt. Die Strukturierung bewirkt, dass die

mechanische Rückwirkung der Außenelektrode auf den Aktor verringert wird. Die im Isolierbereich auftretenden Zugspannungen können sich nicht mehr zu einer kritischen Größe aufaddieren, die die Festigkeit des keramischen Werkstoffs übersteigt und sich in Rissen entlädt.

- 5 Eine optimale Wirkung wird erzielt, wenn die Tiefe der die Struktur erzeugenden Abtragungen an der Oberfläche des Aktors der Dicke des Isolierbereichs entspricht. Der Werkstoff des Isolierbereichs wird ständig unterbrochen, so dass auftretende Spannungen nicht weitergeleitet werden können und sich dadurch auch nicht zu einer kritischen Größe aufaddieren können. Die Dicke des
- 10 Isolierbereichs ist unter anderem auch von der Größe des Aktors abhängig. Bei vollständiger Ausnutzung der Dicke des Isolierbereichs kann die Tiefe der Struktur, die Tiefe der Abtragungen, etwa bis zu 0,5 mm betragen.

- Die Struktur kann an einem Aktor sowohl im Grünzustand als auch im gesinterten Zustand erfolgen. Die Bearbeitung im Grünzustand ist die vorteilhaftere, weil sie
- 15 aufgrund des noch weicheren keramischen Werkstoffs werkzeugschonender ist und auch mit anderen Verfahren als dem üblichen Schleißverfahren durchgeführt werden kann. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die beim Sintern entstehende Sinterhaut die in den Grünkörper eingebrachte Struktur bedeckt und isoliert. Dadurch ist sie zuverlässig gegen elektrische Überschlüge und
- 20 Feuchtigkeit geschützt.

- Das Unterbrechen der Oberfläche des Isolierbereichs durch Abtragungen, insbesondere im Grünzustand, lässt sich auf einfache Weise durch jedes spangebende Bearbeitungsverfahren bewerkstelligen. Im gesinterten Zustand eines Aktors bietet sich neben dem Schleifen noch die Bearbeitung mit einem
- 25 geeigneten Laser an. Die nach dem Sintern durch das Schleifen bearbeitete Oberfläche muss allerdings nachträglich isoliert werden, beispielsweise mit einem Polymerwerkstoff.

- 5 -

Die einfachste Abtragung der Oberfläche ist das Einbringen von linienförmigen Strukturen, insbesondere Nuten in Form von Rillen oder Kerben, weil sie sich auch für eine gezielte Strukturierung größerer Flächen eignen. Dabei können die Nuten parallel verlaufen.

- 5 Die Breite einer Nut, der Abstand zwischen zwei Nuten und der Winkel dieser Nuten gegenüber der Längsachse des Aktors müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass nicht mehr als eine bestimmte Anzahl von Innenelektroden zwischen zwei Nuten an die Aktoroberfläche tritt. Diese maximale Anzahl ist abhängig von der spezifischen Dehnung des Aktors im Betrieb und der Festigkeit des
- 10 keramischen Werkstoffs. Die Nuten können in einem Abstand von 0,2 mm bis 10 mm angeordnet sein, auf die Größe des Aktors abgestimmt. Als besonders geeignet hat sich zwischen zwei Nuten ein Abstand von etwa fünf Lagen von Innenelektroden oder ein Abstand von etwa 0,8 mm bis 1,2 mm erwiesen. Wird die Anzahl der Innenelektroden zu hoch gewählt, so addieren sich die
- 15 Zugspannungen von Elektrode zu Elektrode auf und überschreiten den kritischen Wert, der zur Rissbildung führt.

- Die Nuten können in einem Winkel von 0 Grad bis 80 Grad zur Längsachse des Aktors angeordnet sein. Bei 0 Grad verlaufen die Nuten parallel zur Längsachse des Aktors. Vorteilhaft ist ein Bereich von 50 Grad bis 30 Grad. Wird als
- 20 Schnittwinkel beispielsweise 45° gewählt, so ergeben sich als günstige Parameter ein Abstand zwischen zwei Nuten und eine Breite der Nuten von etwa 0,7 mm, etwa $1\text{mm}/\sqrt{2}$.

- Beispielhaft wird anhand der Figuren 3, 4 und 5 die Herstellung eines erfindungsgemäßen Vielschichtaktors beschrieben. Ein niedrig sinternder
- 25 piezokeramischer Werkstoff, beispielsweise der aus der DE 198 40 488 A1 bekannte SKN53, wird mit einem organischen Bindemittel als 125 µm dicke Grünfolie präpariert. Auf diese Grünfolie wird eine Innenelektrodenpaste aus Silber-Palladium-Pulver mit einem Gewichtsverhältnis der Anteile von 70/30 und einem geeigneten Bindemittel mittels Siebdruck aufgebracht. Eine Vielzahl

derartiger Grünfolien wird zu einem Block aufeinandergestapelt und unter den bekannten Bedingungen von Druck und Temperatur laminiert. Aus dem Laminat werden die einzelnen stabförmigen Aktoren herausgetrennt.

Erfindungsgemäß werden dann, wie in Figur 3 in einem perspektivisch
5 gezeichneten Ausschnitt zu sehen ist, in die Oberfläche 10 eines jeden einzelnen Vielschichtaktors 1 in einem spangebenden Bearbeitungsverfahren, beispielsweise mit einem Scheibenfräser, auf den zu kontaktierenden Seiten unter einem geeigneten Winkel 25 zur Längsachse 23 des Aktors 1 Nuten 20 mit einer solchen Tiefe 24 eingefräst, dass der inaktive Isolierbereich 14 völlig durchtrennt
10 wird. Das Einfräsen der Nuten 20 wird in regelmäßigen Abständen 21 wiederholt. Die dadurch entstehenden Unterbrechungen 19 in der Oberfläche 10 des Aktors bilden eine Strukturierung 18 in Form paralleler Streifen, wie in Figur 4 dargestellt.

Die Breite 22 einer Nut 20, der Abstand 21 zwischen zwei Nuten 20 und der Winkel 25 der Nuten 20 zur Längsachse 25 sind hier so aufeinander abgestimmt,
15 dass nicht mehr als fünf Innenelektroden 3 zwischen zwei Nuten 20 an die Oberfläche 10 des Aktors treten. Figur 3 zeigt die nicht metallisierte Oberfläche 10 des Aktors, auf der sich der Verlauf der an die Oberfläche 10 tretenden Innenelektroden 3 sowie der Verlauf der Nuten 20 verfolgen lässt.

Auf der durch die Strukturierung 18 verbliebenen Oberfläche 10 des Aktors 1 wird,
20 wie in Figur 4 ersichtlich, mittels eines Druckverfahrens die Grundmetallisierung 11 aus einer silberhaltigen Einbrennpaste aufgebracht. Nach dem Einbrennen der Grundmetallisierung 11 werden die Außenelektroden durch ein aufgelötetes Metalldraht-Netz vervollständigt.

In Figur 5 ist die Oberfläche 10 eines Aktors 1 dargestellt, der nach dem oben
25 beschriebenen Verfahren präpariert worden ist. Seine Strukturierung 18 besteht aus sich kreuzenden Nuten 20. Diese schneiden jeweils die Längsachse 23 des Aktors unter einem Winkel 25 und bilden dadurch eine Gitterstruktur 26. Auch hier

- 7 -

ist zunächst nur die Grundmetallisierung 11 auf die Oberfläche 10 des Aktors aufgebracht, die durch die Abtragungen, die Nuten 20, verblieben ist.

Die dergestalt im Grünzustand vorbereiteten Aktoren werden bei etwa 400°C pyrolysiert und bei etwa 1100 °C gesintert.

- 5 Anhand der nachfolgenden Ausführungsbeispiele wird nachgewiesen, dass durch die Erfindung die Ursache der Rissbildung in Vielschichtaktoren beseitigt wird.

Entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren wurden als erste Variante Aktorgrundkörper mit einer Querschnittsfläche von 12,50 mm x 12,50 mm und 37,50 mm Länge als Grünkörper hergestellt. Die Dicke einer Keramikeinzellage, 10 einer Grünfolie, betrug 125 µm, die Dicke der Metallisierungsschicht der Innenelektrode 3 µm. Diese Ausführungsvariante diente als Referenzmuster und stellte den Stand der Technik dar.

Entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren wurden als zweite Variante Aktorgrundkörper mit einer Querschnittsfläche von 12,50 mm x 12,50 mm und 15 37,50 mm Länge als Grünkörper hergestellt. Die Dicke einer Keramikeinzellage, einer Grünfolie, betrug 125 µm, die Dicke der Metallisierungsschicht der Innenelektrode 3 µm. Die Aktorgrundkörper wurden auf den mit einer Außenelektrode zu kontaktierenden Seiten mit einem Scheibenfräser mit 0,7 mm Schnittbreite unter einem Winkel von 45° zur Aktorlängsachse in regelmäßigen 20 Abständen eingefräst. Die Tiefe der Nuten von 0,5 mm entsprach der Dicke des Isolierbereichs. Der Abstand zwischen den Nuten betrug jeweils 0,7 mm.

Entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren wurden als dritte Variante Aktorgrundkörper mit einer Querschnittsfläche von 12,50 mm x 12,50 mm und 37,50 mm Länge als Grünkörper hergestellt. Die Dicke einer Keramikeinzellage, 25 einer Grünfolie, betrug 125 µm, die Dicke der Metallisierungsschicht der Innenelektrode 3 µm. Die Aktorgrundkörper wurden auf den zu kontaktierenden Seiten mit einem Scheibenfräser mit 0,2 mm Schnittbreite unter einem Winkel von

90° zur Aktorlängsachse in regelmäßigen Abständen eingefräst. Die Tiefe der Nuten von 0,5 mm entsprach der Dicke des Isolierbereichs. Der Abstand zwischen den Nuten betrug jeweils 1,0 mm. Der Verlauf der Nuten in diesem Test entspricht nicht dem in der Praxis vorgesehenen Verlauf, weil durch ihn eine von der Nutenbreite abhängige Anzahl von Innenelektroden, die an die Oberfläche geführt sind, weggefräst und nicht an die Außenelektrode angeschlossen wurde. Der Nutenverlauf wurde gewählt, weil die Nuten wie Kerben wirken und damit bei der Längsausdehnung eines Aktors die ungünstigste Wirkung auf seine Zugfestigkeit haben. Es sollte geprüft werden, welche Auswirkungen eventuell zusätzlich auftretende Risse auf die Struktur der Oberfläche haben könnten.

Entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren wurde als vierte Variante ein Körper mit einer Querschnittsfläche von 100 mm x 12,50 mm und 37,50 mm Länge als Grünkörper hergestellt, der nach dem Erzeugen der Struktur in acht einzelne stabförmige Aktorgrundkörper zerlegt wurde. Die Dicke einer Keramikeinzellage, einer Grünfolie, betrug 125 µm, die Dicke der Metallisierungsschicht der Innenelektrode 3 µm. Die Aktor-Riegel wurden auf den zu kontaktierenden Seiten mit einem Scheibenfräser mit 0,7 mm Schnittbreite unter einem Winkel von 45° zur Aktorlängsachse in regelmäßigen Abständen eingefräst. Die Tiefe der Nuten von 0,5 mm entsprach der Dicke des Isolierbereichs. Der Abstand zwischen den Nuten betrug jeweils 0,7 mm.

Die Aktorgrundkörper der obigen vier Ausführungsbeispiele wurden bei etwa 400°C pyrolysiert und anschließend bei etwa 1100 °C gesintert.

Entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren wurden als fünfte Variante Aktorgrundkörper mit einer Querschnittsfläche von 12,50 mm x 12,50 mm und 37,50 mm Länge als Grünkörper hergestellt. Die Dicke einer Keramikeinzellage, einer Grünfolie, betrug 125 µm, die Dicke der Metallisierungsschicht der Innenelektrode 3 µm. Die Aktorgrundkörper wurden pyrolysiert und gesintert. Erst danach wurden mit einer Diamantsäge auf den zu kontaktierenden Seiten Schnitte mit 0,2 mm Schnittbreite unter einem Winkel von 45° zur Aktorlängsachse in

regelmäßigen Abständen eingefräst. Die Tiefe der Nuten von 0,4 mm entsprach der Dicke des Isolierbereichs. Der Abstand zwischen den Nuten betrug 0,6 mm. Nach sorgfältiger Reinigung wurden die Nuten mit einem Silikonharz gefüllt. Das Harz wurde bei 140°C ausgehärtet.

- 5 Bei den Vielschichtaktoren der obigen fünf Varianten wurden die Kontaktseiten zum Anschluss der Außenelektroden und die Stirnflächen der Kopf- und Fußbereiche durch Schleifen bearbeitet. Auf den restlichen Seiten verblieb die Sinterhaut als Isolierschicht.

- 10 Auf die Aktorkörper der fünf Varianten wurden nach dem Sintern mit einem bekannten Verfahren die Außenelektroden, die aus einem Drahtnetz bestanden, aufgelötet. Der Werkstoff des Netzes war ein dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Keramikwerkstoffs angepasster Werkstoff, beispielsweise FeNi₃₈. Der Drahtdurchmesser betrug 100 µm, die Maschenweite 200 µm. Das Netz war galvanisch vorbehandelt, beispielsweise verkupfert, um die
15 Lötbarkeit zu ermöglichen. Als Lot wurde SnAg₄ verwendet. Die Lötzeit betrug 2 Minuten bei 240 °C.

- Die so hergestellten Vielschichtaktoren wurden gereinigt und mit einer geeigneten Lackierung isoliert. Nach dem Anlöten von Anschlussdrähten an die Elektrodennetze wurden die Aktoren in Prüfraumen mit 2000 N vorgespannt und
20 mit einem Trapezsignal angesteuert. Dabei wurde die Ansteuerspannung in 100 µs von 0 V auf 200 V angehoben, 1 ms auf 200 V gehalten, und dann in 100 µs auf 0 V erniedrigt. Die Wiederholfrequenz war 200 Hz. Die Aktoren erreichten dabei Betriebstemperaturen von 150 bis 160 °C.

- Die erste Variante als Stand der Technik zeigte bereits bei 10⁶ Zyklen deutliche
25 und starke Rissbildung. Die Risse durchtrennen die Isolierzone in beliebigen Richtungen, Risse entlang der Innenelektroden traten weniger auf.

CeramTec AG
Innovative Ceramic Engineering

NR. 986 S. 12/21
12.02.2002 - Dr. Sa/Mo
OZ 02010 DE

- 10 -

Die Varianten zwei bis fünf zeigten nahezu identisches Verhalten, das sich von dem der ersten Variante deutlich unterschied. Auch nach 10^8 Zyklen traten in den Aktoren keine Risse auf.

Patentansprüche

1. Piezokeramischer Vielschichtaktor (1) mit alternierend an sich gegenüberliegenden Oberflächen (10) des Aktors (1) geführte Innenelektroden (3), die auf der jeweiligen Oberfläche (10) durch eine
5 Außenelektrode (4, 5) miteinander verbunden sind, die mindestens aus einer auf dem inaktiven Bereich (14) des Aktors (1) aufgetragenen Schicht einer Grundmetallisierung (11) besteht, mit der mittels einer Verbindungsschicht (13) eine Verstärkungsschicht (12) verbunden ist, an der ein Anschluss (6) zu einer Spannungsquelle angelötet sein kann, dadurch gekennzeichnet, dass
10 die Oberfläche (10) des Vielschichtaktors (1) im inaktiven Bereich (14) eine Struktur (18) aufweist, die durch die Oberfläche (10) unterbrechende Abtragungen (19) erzeugt ist und dass die Grundmetallisierung (11) ausschließlich auf der durch die Struktur (18) verbliebenen Oberfläche (10) aufgetragen ist.
- 15 2. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass die Tiefe (24) der die Struktur (18) erzeugenden Abtragungen (19) an der Oberfläche (10) des Aktors (1) der Dicke des Isolierbereichs (14) entspricht.
3. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch
20 gekennzeichnet, dass die Tiefe (24) der Struktur (18) bis etwa 0,5 mm beträgt.
4. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die die Struktur (18) erzeugenden Abtragungen (19) der Oberfläche (10) des Aktors (1) aus Nuten (20) besteht.
- 25 5. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Nuten (20) parallel zueinander angeordnet sind.

- 12 -

6. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Breite (22) einer Nut (20), der Abstand (21) zwischen zwei Nuten (20) und der Winkel (25) dieser Nuten (20) gegenüber der Längsachse (23) des Aktors (1) so aufeinander abgestimmt sind, dass nicht mehr als eine vorgegebene Anzahl von Innenelektroden (3) zwischen zwei Nuten an die Oberfläche (10) des Aktors tritt.
7. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 4 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Breite (22) der Nuten (20) 0,2 mm bis 2 mm, vorzugsweise 0,2 mm bis 0,7 mm beträgt.
8. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Nuten (20) in einem Abstand (21) von 0,2 mm bis 10 mm angeordnet sind.
9. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die optimale Anzahl von Innenelektroden (3), die zwischen zwei Nuten an die Oberfläche (10) des Aktors tritt, etwa fünf ist und damit der Abstand der Nuten (20) voneinander etwa 0,8 mm bis 1,2 mm beträgt.
10. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 4 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Nuten (20) in einem Winkel von 0 Grad bis 80 Grad, vorzugsweise von 30 Grad bis 50 Grad, zur Längsachse (23) des Aktors (1) verlaufen.
11. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 4 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (18) ein Gitter (26) aus sich kreuzenden Nuten (20) ist.

- 13 -

12. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (18) durch ein spangebendes Bearbeitungsverfahren erzeugt ist.
13. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (18) durch ein Laserverfahren erzeugt ist.
14. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (18) im Grünzustand des Aktors (1) in die Oberfläche (10) eingebracht ist.
15. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (18) im gesinterten Zustand des Aktors (1) in die Oberfläche (10) eingebracht ist.
16. Verfahren zur Herstellung eines piezokeramischen Vielschichtaktors nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass auf der Oberfläche des inaktiven Bereichs des Aktors durch Abtragungen der Oberfläche eine Struktur erzeugt wird und dass die Grundmetallisierung zur Verbindung der Innenelektroden ausschließlich auf der durch die Struktur verbliebenen Oberfläche aufgetragen wird.
17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung der Struktur die Oberfläche in einer Dicke abgetragen wird, die der Dicke des Isolierbereichs entspricht.
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass in der Oberfläche des Aktors Nuten erzeugt werden.
19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Nuten parallel angeordnet werden.

- 14 -

20. Verfahren nach Anspruch 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Breite einer Nut, der Abstand zwischen zwei Nuten und der Winkel dieser Nuten gegenüber der Längsachse des Aktors so aufeinander abgestimmt werden, dass nicht mehr als eine vorgegebene Anzahl von Innenelektroden zwischen zwei Nuten an die Oberfläche des Aktors tritt.
21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass die Anzahl von Innenelektroden, die zwischen zwei Nuten an die Oberfläche des Aktors tritt, mit fünf festgelegt wird.
22. Verfahren nach einem der Ansprüche 18 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass eine Gitterstruktur durch sich kreuzende Nuten erzeugt wird.
23. Verfahren nach einem der Ansprüche 18 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur durch ein spangebendes Bearbeitungsverfahren erzeugt wird.
24. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur durch ein Laserverfahren erzeugt wird.
25. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur im Grünzustand des Aktors erzeugt wird.
26. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur im gesinterten Zustand des Aktors erzeugt wird.

- 15 -

Zusammenfassung

- Bei Außenelektroden an piezokeramischen Vielschichtaktoren wirken während des Betriebs starke Zugspannungen auf den Isolierbereich unter der Grundmetallisierung. Da dieser Isolierbereich zusammen mit der
- 5 Grundmetallisierung und der Verbindungsschicht eine homogene Einheit bildet, versagt diese beim Überschreiten der Zugfestigkeit des schwächsten Gliedes und es bilden sich Risse. Die unkontrolliert durch den Isolierbereich verlaufenden Risse sind sehr kritisch, da sie den Isolationsabstand verringern und die Wahrscheinlichkeit eines Aktorausfalls durch Überschlüsse stark erhöhen.
- 10 Erfindungsgemäß wird deshalb vorgeschlagen, dass die Oberfläche (10) des Vielschichtaktors (1) im inaktiven Bereich (14) eine Struktur (18) aufweist, die durch die Oberfläche (10) unterbrechende Abtragungen (19) erzeugt ist und dass die Grundmetallisierung (11) ausschließlich auf der durch die Struktur (18) verbliebenen Oberfläche (10) aufgetragen ist.
- 15 (Figur 3)